

エアロゲルサンプルコレクターによる 火星ダスト捕集性能評価

○小澤宇志, 鈴木俊之(JAXA), 畠山義清(日大), 田端誠, 長谷川直, 藤田和央(JAXA)

Abstract

A study of capturing Martian dust particles using aerogel during the Martian atmospheric flight has been performed so as to improve the feasibility of a sample return mission to Mars. At Japan Aerospace Exploration Agency, a two-layered carbon aerogel-silica aerogel (CASA) sample collector has been developed for the mission, and arcjet heating tests and light gas-gun capture simulations have been conducted to investigate characteristics of the sample collector. Although the recession of carbon aerogel has been observed due to oxidation surface reactions in the heating tests, the CASA sample collector was capable of capturing 5 μ m Martian dust particles.

1. 目的および背景

現在, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) では地質学・気象学的見地から火星無着陸サンプルリターン¹⁾ (MASC: Mars Aero-flyby Sample Collection) ミッションを計画している. 本システムは, 火星大気圏に突入した探査機が火星大気中に浮遊するダスト粒子を極超音速飛行中に捕集するものである. サンプルリターンによって長期的な分析が可能となり, 火星地殻の化学的組成, 同位体組成, 鉱物学的組成の解明に貢献することが期待されている.

火星では高度 25-45 km においてダスト粒子が浮遊しており, MASC 火星探査機は火星大気圏突入後, 誘導制御飛行を行いつつ, 高度約 25-45 km において火星ダストや火星大気サンプルを採取する. 火星ダストは, モンモリロナイトやパラゴナイトのような粘土鉱物が主成分と考えられており, MASC では火星大気飛行速度約 4.2 km/s においてこのような物性の粒子捕集を目指している. 例えば, 高度 30 km において断面積約 20 cm² のサンプルコレクターを用いてサンプル捕集を 10 秒間行った場合, 5 μ m 粒子を約 30 個捕集することができる²⁾.

しかし, 上記の極超音速飛行環境ではサンプルコレクター表面が表面圧力約 0.6 kPa, 加熱率 30~170 kW/m² の熱環境に曝される³⁾とともに, 秒速 4 km 以上で突入してくる微粒子がサンプルコレクターへの衝突衝撃や熱によって破壊, 熱変成する可能性がある⁴⁾. 従って, ミッションの実現に向けて, MASC 飛行環境に適したサンプルコレクターの開発が必要不可欠である.

我々はこれまでミクロンクラスの火星ダスト粒子捕集を目指して, NASA のスターダストミッションやデブリ採取等で実績のあるシリカエアロゲル (SA) による粒子捕獲を検討してきた. しかし, SA

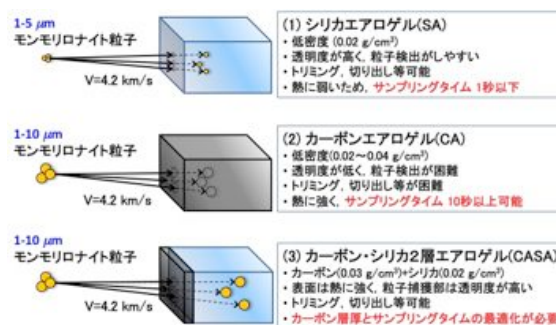


図 1 MASC サンプルコレクター特性比較.

の熱耐性を検証した結果, MASC 熱環境下ではサンプルング時間 1 秒以下が適しており, ダストサンプルサイズがマイクロサイズに限定されてしまうことが判明した. そこで本稿では SA に加え, より大きなダストサンプル捕集を目指したカーボンエアロゲル(CA)の利用を検討する. さらに, 図 1に示すように CA と SA の双方の利点を活かしたカーボン・シリカ二層エアロゲル(CASA)を提案し, 3 種類のサンプルコレクターの性能を比較検証する.

2. 研究手法

2.1. エアロゲルサンプルコレクターBBM

本稿では図 2に示すようなエアロゲルサンプルコレクター実験室モデル(BBM: Bread Board Model)を製作した. 各試験片は 14×12×19 mm³ のサイズにトリミングする. CASA に関しては, 10×10×10 mm³ のシリカエアロゲルを石英の治具に固定し, 1~2 mm 厚に整形された CA 層を SA 層に圧着し, アルミニウム製のホルダーに合計 6 個固定する. 暴露表面には, 純チタン製のカバーを使用する. SA は密度が 0.02 g/cm³, CA は密度が 0.025~0.04 g/cm³ のエアロゲルを使用する.

2.2. アーク加熱試験

JAXA 調布航空宇宙センター所有の 750kW アーク加熱風洞においてサンプルコレクターBBM の加

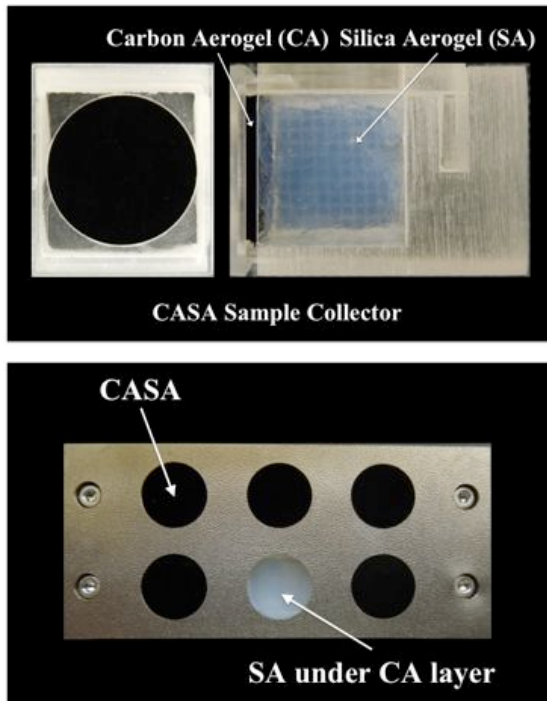


図 2 CASA サンプルコレクター-BBM モデル.

熱試験を行い、火星加熱環境下における耐熱性能を実証する。加熱試験は、図 3 のようにサンプルコレクターを-30 度ウェッジホルダーに固定し、表面圧力 0.6 kPa、加熱率 100~200 kW/m² を想定して、試験気流 Air、質量流量 10 g/s、電流 300 A の条件に設定して実施する。加熱時間は CA の供試体に関しては 10 秒、CASA に関しては 2~3 秒に設定する。また、試験気流検定においてはガードゲージにより加熱率を計測し、気流圧力は圧力トランスデューサ (Kulite) により計測する。

2.3. 軽ガス銃撃込試験

JAXA 宇宙科学研究所の二段式新型軽ガス銃を使用し、火星ダストを模擬したエアロゲル撃ち込み試験を行う。本試験では、10 μ m 以下のサンプル粒子がサンプルコレクターに衝突、貫入する際の影響を評価する。撃ち込み粒子は、火星ダストの主成分と考えられているモンモリロナイト粘土鉱物を 5 μ m と 10 μ m クラスに分級したものを使用する。約 0.6 mg の撃ち込み粒子をプロジェクトイル・サボに詰め込み、散弾銃として粒子をターゲットに撃ち込む。CASA に関しては、アーク風洞試験で表面加熱した試験片を使用し、比較対象としてシリカエアロゲルのみの試験片への撃ち込みも実施する。

エアロゲル試験片は図 4 のようにエアロゲルホルダーに複数個配置し、粒子の拡がり中心に合わせて真空チャンバーにセッティングする。撃ち込み粒子の速度は、MASC 飛行速度 4~5 km/s に設定する。

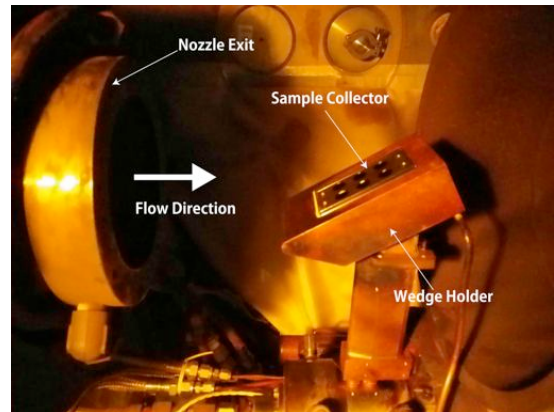


図 3 AWT サンプルコレクター加熱試験.

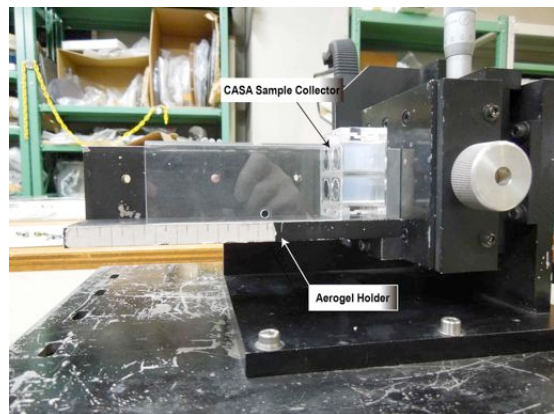


図 4 サンプルコレクター軽ガス銃撃込試験.

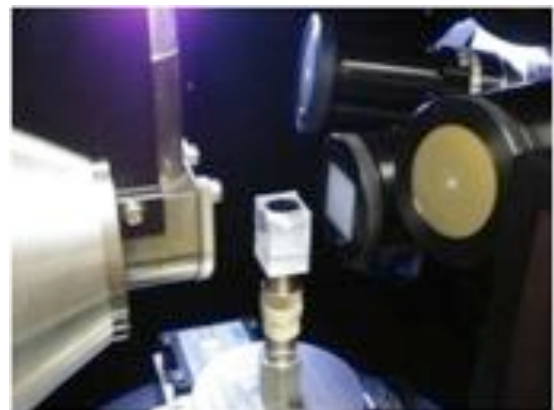


図 5 サンプルコレクターX線CT分析.

2.4. 分析手法

サンプルコレクターの性能を評価するため、撃ち込み試験後にエアロゲル・粒子分析を行い、粒子のトラック長等を評価する。分析は、第一に光学顕微鏡 (VHX-1000, Keyence 等) による観察を行い、撃ち込み表面を分析する。第二に、マイクロエックス線 CT (Xradia XCT-200) により、CT スキャンを行い、エアロゲル内部の粒子分布分析を行う (図 5 参照)。最後に、SEM (走査型電子顕微鏡)-マニピュレーターシステムを用いて、SEM 分析及びナノマニピュレーターによる微粒子ピックアップを行う。



図 6 AWT 加熱試験中のサンプルコレクター周りの斜め衝撃波。

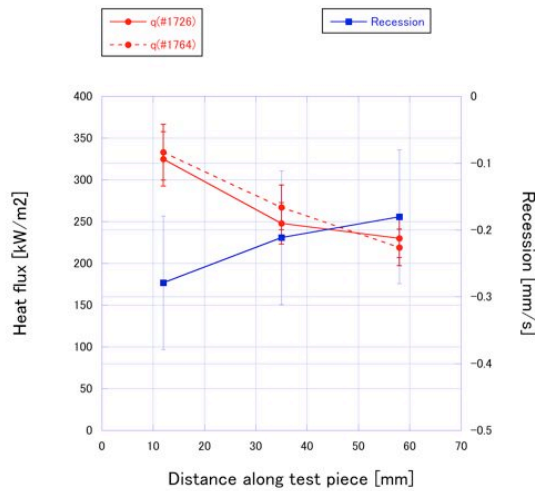


図 7 ウェッジホルダー表面の熱流束とリセッション分布。

3. 結果と考察

3.1. 加熱試験結果

アーク風洞加熱試験のサンプルコレクター周りの流れ場を図 6 に示す。図に見られるように、-30 度ウェッジホルダー周りに斜め衝撃波が生じており、サンプルコレクター表面において強い発光が見られる。気流検定の結果、ウェッジホルダー表面の圧力分布は上流部では圧力約 0.8 kPa、下流部では約 0.5 kPa であり、MASC サンプリング環境(0.6 kPa)を模擬できていることが判明した。加熱率に関しては、上流部から下流にかけて 340~220 kW/m²(図 7 参照)であり、MASC サンプリング環境(100 kW/m²以下)よりも高い加熱率である。それぞれの加熱率に対応するリセッション速度を厚さ計測より求めたところ、上流部では約-0.28 mm/s、下流部では約-0.18 mm/s であった。加熱率 100 kW/m²以下の場合、リセッション速度は-0.05 mm/s 以下と予測される。

3.2. エアロゲル撃込試験結果

加熱試験後、軽ガス銃撃ち込み試験をモンモリロナイト粒子を使用して実施した。ターゲットには

SA と CA 層厚さ 0.5~1.5 mm の CASA を使用した。撃ち込み速度は 5.0±0.1 km/s であり、5μm 粒子は半径約 30 mm の範囲に分散したため、エアロゲルはこの範囲内にセットした。

撃ち込み表面や SA 層は、光学顕微鏡で粒子貫入穴形状やトラック形状を観察することが可能である。一方、CA 層に捕集された粒子は光学顕微鏡による分析が困難であるため、本稿ではマイクロ・エックス線 CT による粒子検出、トラック長分析を行った。エックス線 CT により蓄積された撮像を 3D で解析した結果、CASA に撃ち込まれた 5μm モンモリロナイトの貫入距離は図 8 のような分布であることが判明した。厚さ 0.8 mm の CA 層を使用した場合、5μm 粒子は約 80% が CA 層で捕集され、残りの約 20% が SA 層で捕集される。CA 層では貫入距離が長くなるにつれて、粒子数は一様に減少しているが、SA 層では貫入距離が 300~400 μm でピークがある。また、SA 層のトラックは CA 層と比べて空洞が大きく、先端の粒子検出、トラック形状、トラック長の分析が比較的容易である。

次に、カーボンエアロゲルに対する平均貫入距離 L について、試験結果を式(1)のような改良 Horz モデル⁵⁾の結果と比較した(図 9 参照)。

$$L = L_{ref} d_p \times \left(\frac{\rho_p}{\rho_T} \right)^{0.860} \quad (1)$$

シリカエアロゲルに対するトラック分析については、文献 6 において実験と解析結果の比較が示されている。本研究では、シリカエアロゲルの場合と同様にカーボンエアロゲルにおいてもエアロゲル密度が低くなるほど粒子の貫入距離が長くなるような密度依存性が確認された。ただし、カーボンエアロゲルの場合、エアロゲル密度 0.03 g/cm³ においても平均貫入距離は 0.5 mm 程度でシリカエアロゲルの場合よりも短くなっている。結果として、カーボンエアロゲルの方がシリカエアロゲルよりも高強度であると考えられる。CA に対しては、アルミナ粒子では代表長 L_{ref} を 0.25、モンモリロナイト粒子では L_{ref} を 1.8 とすると実験と解析結果で良い一致が得られた。より多くの粒子を SA 層で捕集するためには、サンプリング時間と CA 層リセッション量の最適化が必要である。

3.3. エアロゲル分析と今後の計画

現在、JAXA において開発中の SEM-マニピュレーターシステム(文献 7 参照)を用いて、エアロゲル撃ち込み表面分析及び微粒子ピックアップ操作を行う。また、MASC ミッションの実現に向けて、振

製造技術・薄膜整形技術の向上やサンプルコレクター一治具の改良を目指す。

謝辞

エアロゲル試験片を制作していただいた河合秀幸教授、軽ガス銃撃ち込み試験に協力していただいた皆様、X線CT分析に協力していただいた皆様にあらためて感謝の意を表明したい。また、サンプリングに関してアドバイスしていただいた矢野創博士、橋省吾教授、黒澤耕介博士、MASCWGの皆様へ感謝の意を表明したい。

参考文献

- 1) Fujita, K., *et al.*, “Conceptual Study and Key Technology Development for Mars Aeroflyby Sample Collection,” *Acta Astronautica*, Vol. 93, pp. 84-93, 2014.
- 2) Tomasko, M. G., Doose, L. R., Lemmon, M., Smith, P. H., and Wegryn, E., “Properties of Dust in the Martian Atmosphere from the Imager on Mars Pathfinder,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. E4, pp. 8987-9007, April 1999.
- 3) Terata, I., Nakajima, K., Ogino, Y., and Sawada, K., “Study of Capsule Geometry for Dust Sample Acquisition during Mars Atmospheric Entry Flight,” *AIAA Paper 2011-1039*, Jan. 2011.
- 4) Ozawa, T., Suzuki, T., Takayanagi, H., and Fujita, K., “Investigation of Martian-Dust Drag and Heat Transfer for Mars Sample Return Mission,” *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 25, No. 3, pp. 341-353, 2011.
- 5) Kitazawa, Y., Fujiwara, A., Kadono, T., Imagawa, K., Okada, Y. and Uematsu, K., “Hypervelocity Impact Experiments on Aerogel Dust Collector,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. E9, pp. 22035-22052, 1999.
- 6) Ozawa, T., Suzuki, T., Okudaira, K., Mikouchi, T., Kurosawa, K., Takayanagi, H., Sugita, S. and Fujita, K., “Investigation of Martian Dust Sample Capture toward Mars Aero-flyby Sample Collection Mission,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol. 10, No. ISTS28, pp. Pk11-Pk17, 2012.
- 7) Ozawa, T., Suzuki, T., Kurosawa, K., Hatakeyama, Y., and Fujita, K., “Investigation of New Martian Dust Sample Capture System,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol. 12, No. ISTS29, 2014 (accepted).

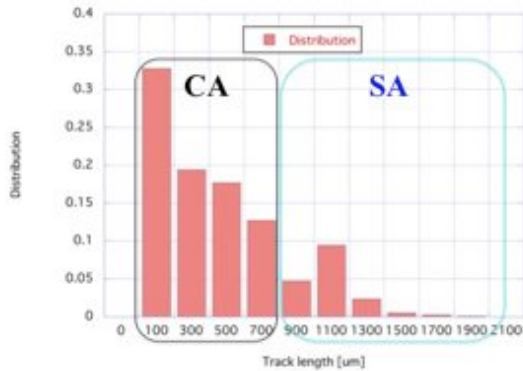


図 8 CASA[CA(0.03 g/cc, 0.8 mm)+SA(0.02 g/cc)]に撃ち込まれた 5 μ m モンモロロナイト粒子の貫入距離分布。

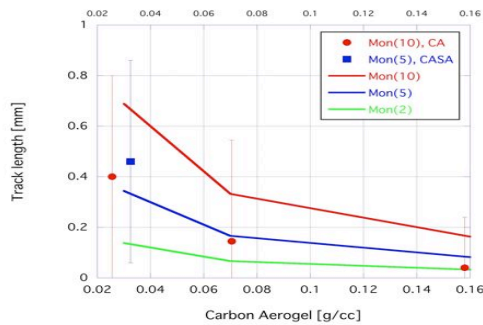


図 9 CA におけるモンモロロナイト粒子貫入距離の密度依存性。

動試験等のサンプルコレクターBBM 認定試験(QT: Qualification Test)を実施する。

4. おわりに

MASC ミッションの実現に向けて、カーボンエアロゲルを用いた火星ダスト用 CASA 二層式サンプルコレクターBBM を開発した。まず、サンプルコレクターの熱耐性を AWT 加熱試験により検証した。その結果、加熱率 200 kW/m² において低密度カーボンエアロゲルのリセッション速度は約-0.18 mm/s であった。次に、軽ガス銃エアロゲル撃ち込み試験を実施し、サンプルコレクターの火星ダスト捕集性能を検証した。本稿では初めて 10 μ m 以下クラスのモンモロロナイト粒子の撃ち込みを行った。その結果、厚さ 0.8 mm の CA 層を用いた CASA サンプルコレクターで 5 μ m モンモロロナイト粒子の捕集が可能であることが判明した。また、カーボンエアロゲルにおいても粒子貫入距離の密度依存性が判明し、平均貫入距離のモデル化を行った。

今後は、SEM マニピュレーターシステムによる 5 μ m 粒子切り出し・成分分析技術開発を行う。また、QT 試験に向けて均一なカーボンエアロゲルの